

Applikation von Nickel- und Titanbasisloten durch thermisches Spritzen zur Regeneration komplexer Investitionsgüter

M. Nicolaus, K. Möhwald, H. J. Maier

Institut für Werkstoffkunde, Leibniz Universität Hannover, Garbsen

nicolaus@iw.uni-hannover.de

Abstract

Da das Hochtemperaturreparaturlöten im Vakuum, neben dem Schweißen, bei der Fertigung und Reparatur geometrisch anspruchsvoller Bauteile immer mehr an Bedeutung gewinnt, ist es notwendig, Lötprozesse im Hinblick auf eine weitere Minimierung von Produktionskosten und Steigerung der Produktqualität mit dem Fokus einer ressourcenschonenden Fertigung weiterzuentwickeln. In der Regel werden Hochtemperaturlote in Form von Pasten, Tapes, Melt-Spun Folien und Pulvern hergestellt. Um Bauteile zu löten, wird das (Reparatur-)Lot meist händisch mittels Dosiernadel, Pinsel oder einem Spachtel auf die zu reparierenden Stellen des Bauteils aufgetragen. Durch die pulvermetallurgische Herstellung von Loten besteht weiterhin die Möglichkeit, diese durch thermisches Spritzen zu applizieren. Der Vorteil des Applizierens von Lotwerkstoffen durch thermisches Spritzen besteht darin, dass große Bereiche der zu fügenden oder zu reparierenden Teile endkonturnah beschichtet werden können. In dem vorliegenden Beitrag wird auf thermisch gespritzte Nickel- und Titanbasislote eingegangen. Typische Anwendungsgebiete sind der Maschinen- und Anlagenbau, der Automobilbau, die Biomedizintechnik sowie die Luft- und Raumfahrt. In dieser Arbeit wird gezeigt, wie das Reparaturlöten durch thermisches Spritzen von Turbinenschaufeln in einem Flugzeugtriebwerk eingesetzt werden kann. Die hier vorgestellte Technologie bringt technische und ökonomische Vorteile mit sich und ermöglicht die dem heutigen Stand der Technik entsprechende Prozesskette zur Reparatur von Turbinenschaufeln zu verkürzen.

1 Einleitung

Die Regeneration von komplexen Investitionsgütern, wie z.B. von Bauteilen in der Luftfahrtindustrie und Kraftwerkstechnik, spielt angesichts steigender Rohmaterialien- und Herstellungskosten eine immer stärker werdende Rolle. Die Komponenten von Flugzeugtriebwerken und stationären Gasturbinen, wie Turbinenschaufeln (Lauf- und Leit-

schaufeln) sowie die von Kompressoren, sind extremen Bedingungen ausgesetzt. Infolge der hohen Temperaturen, der starken mechanischen Beanspruchung und der Schädigung durch Fremdpartikeln können solche Bauteile verschiedene Arten von Defekten aufweisen. Dazu gehören plastische Verformungen, Verschleiß durch Umwelteinflüsse, Materialabtragungen und Risse. Um die Lebensdauer solcher Komponenten zu erhöhen, nimmt die Wartung, Reparatur und Überholung (engl. MRO, Maintenance Repair and Overhaul) angesichts des zunehmenden Wettbewerbs in der Branche immer mehr an Bedeutung zu.

Turbinenschaufeln aus Nickelbasislegierungen werden überwiegend in der Hochdruckturbine in der Luftfahrtindustrie und im Kraftwerksbau bei stationären Gasturbinen eingesetzt. Bewährte Reparaturprozesse sind das Schweißen und das Löten [1, 2]. Im Wesentlichen werden die folgenden Schritte zur Reparatur von Turbinenschaufeln durchgeführt [3]:

1. Entfernen der Turbinenschaufelbeschichtung
2. Reinigung
3. Bewertung der Defekte
4. Auswahl des Reparaturverfahrens (Löten oder Schweißen)
5. Schleifen
6. Beschichtung (Heißgaskorrosionsschutz, Wärmedämmschicht)

Da in diesem Beitrag auf das Reparaturlöten von Turbinenschaufeln eingegangen wird ergibt sich, nach dem heutigen Stand der Technik, folgende Vorgehensweise:

Die verschlissene Turbinenschaufel wird bis auf den Grundwerkstoff entschichtet. Es erfolgt der manuelle Auftrag des Lotes in Form von Pasten, Melt-Spun Folien oder Tapes, wobei es sich ebenfalls um Nickelbasislegierungen handelt. Nach dem Löten im Hochvakuum wird überschüssiges Lot durch Schleifen oder Fräsen entfernt. Anschließend wird die Heißgaskorrosionsschutzschicht (z.B. NiCoCrAlY) durch thermisches Spritzen appliziert. Die Turbinenschaufel wird danach einem Alitierprozess unterzogen, um die Heißgaskorrosionsbeständigkeit weiter zu erhöhen, was auf die Bildung der β -Phase (NiAl) zurück zu führen ist [4].

Das angewandte Reparaturverfahren ist teuer und beinhaltet mehrere Prozessschritte. Ziel der vorliegenden Arbeit war es daher, eine zweistufige füge- und beschichtungstechnische Hybridtechnologie zu entwickeln, um die Prozesskette zum Reparaturlöten von Turbinenschaufeln zu verkürzen. Das Verkürzen dieser Prozesskette wird durch das Aufbringen der zur Reparatur benötigten Werkstoffe durch thermisches Spritzen erreicht. Die defekte Turbinenschaufel erhält eine Reparaturbeschichtung, bestehend aus

dem Nickelbasislot, der Heißgaskorrosionsschutzschicht (NiCoCrAlY) und abschließend einer Aluminiumschicht. Diese Reparaturbeschichtung wird anschließend einer Wärmebehandlung unterzogen, die gleichzeitig Löten und Alitieren kombiniert. In früheren Beiträgen wurde die Machbarkeit dieser Hybridtechnologie, in der Nickelbasislegierungen verwendet wurden, beschrieben [5, 6]. Das Prinzip der Prozesskettenverkürzung zeigt *Abb. 1*.

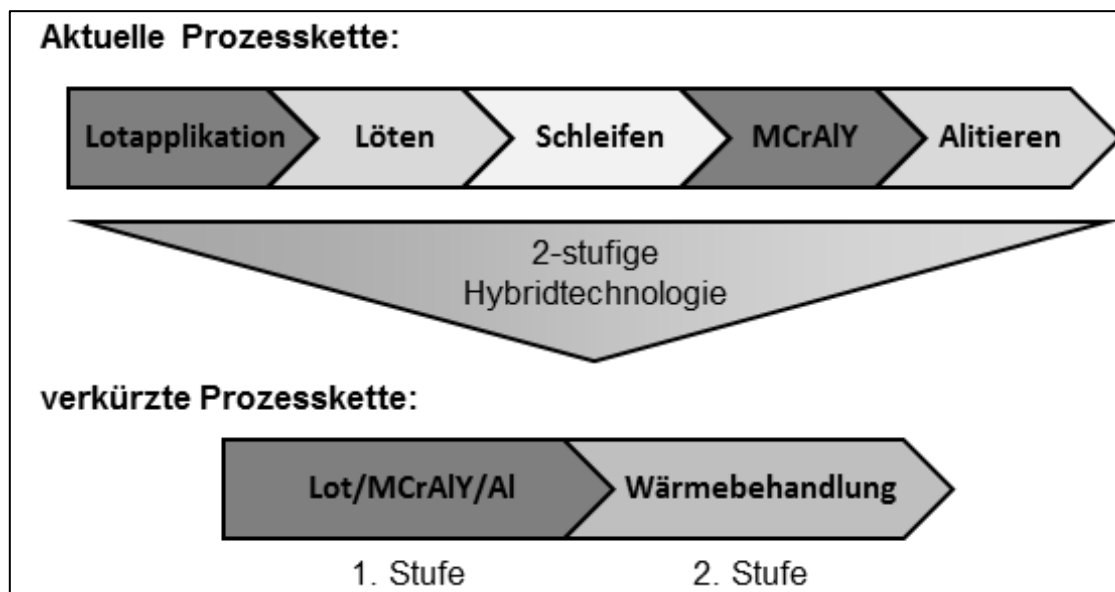


Abb. 1: Prozesskette zum Reparaturlöten von Turbinenschaufeln

Weiterhin konnte gezeigt werden, dass auch die Applikation des Titanbasislots TiCu15Ni15 durch thermisches Spritzen möglich ist [7]. Während bei Nickelbasislegierungen prinzipiell jedes thermische Spritzverfahren angewendet werden kann, wird bei Titan und Titanlegierungen aufgrund der hohen Sauerstoffaffinität das Kaltgasspritzen eingesetzt. Sowohl bei den thermisch gespritzten Titan- als auch bei den Nickelloten wurden Lötnahtfestigkeiten von ca. 430–450 MPa erreicht, was typische Werte sind, wie man sie auch in der Literatur findet [8, 9].

2 Experimentelle Arbeiten

Die experimentelle Durchführung entsprach der in [5, 6, 7] beschriebenen Vorgehensweise.

Als Substrate für die Beschichtung wurden Inconel 718 und TiAl6V4 Flachproben (30 mm x 30 mm x 2 mm) verwendet. Die Flachproben wurden mit Edeldkorund EKF54

(Korngröße 250 μm –355 μm) gestrahlt, danach mit Isopropanol im Ultraschallbad gereinigt und anschließend durch thermisches Spritzen beschichtet. Die Beschichtung der Inconel 718 Flachprobe mit dem Nickelbasislot Ni650 (NiCrSi), NiCoCrAlY und Aluminium erfolgte durch das atmosphärische Plasmaspritzen (APS, Delta-Brenner, GTV-Verschleißschutz, Luckenbach). Die Beschichtung der TiAl6V4-Flachproben erfolgte mittels Kaltgasspritzen (CGT Kinetiks 4000/34, CGT, Rattenkirchen). Das Titanlotpulver wurde durch Mischen von 70 Ma.% Titan-, 15 Ma.% Nickel- und 15 Ma.% Kupferpulver in einem Taumelmischer hergestellt. In *Tab. 1* sind die Beschichtungsparameter aufgelistet.

Tab. 1: Beschichtungsparameter

	<i>Atmosphärisches Plasmaspritzen</i>	<i>Kaltgasspritzen</i>
<i>Stromstärke / A</i>	<i>390</i>	
<i>Ar / L·min⁻¹</i>	<i>40</i>	
<i>H₂ / L·min⁻¹</i>	<i>10</i>	
<i>N₂ / bar</i>		<i>35 bei 750 °C</i>
<i>Pulverfördermenge / g·min⁻¹</i>	<i>25</i>	<i>20</i>
<i>Verfahrgeschwindigkeit / m·s⁻¹</i>	<i>0,9</i>	<i>0,2</i>
<i>Düsenabstand / mm</i>	<i>130</i>	<i>30</i>

Die beschichteten Inconel 718- und TiAl6V4 Proben wurden in einem Hochvakuumofen (PVA Tepla, Wettenberg) wärmebehandelt, wobei der Druck in der Ofenkammer ca. 10^{-5} mbar betrug. Die Proben wurden mit einer Rate von 20 K/min auf die Löttemperatur aufgeheizt. Die Löttemperatur für die Nickelbasislegierung betrug 1.090 °C und 1.190 °C sowie 1.000 °C für die Titanlegierung. Die Haltezeit bei den entsprechenden Löttemperaturen betrug jeweils 15 min. Anschließend erfolgte eine freie Abkühlung unter Vakuum. Diese Wärmebehandlung stellt einen konventionellen Standardlötprozess dar.

Die Beurteilung der beschichteten und gelöteten Proben erfolgte an Querschliffen durch licht- und elektronenmikroskopische Untersuchungen. Weiterhin wurden die Zugfestigkeiten gelöteter zylindrischer Stumpfstoßverbindungen in Anlehnung an DIN EN ISO 6892-1 [10] bestimmt.

3 Ergebnisse

Abbildung 2 zeigt die Schlifffbilder beschichteter Inconel 718 Flachproben im Zustand „as-sprayed“ sowie nach einer Wärmebehandlung bei 1.190 °C und 1.090 °C.

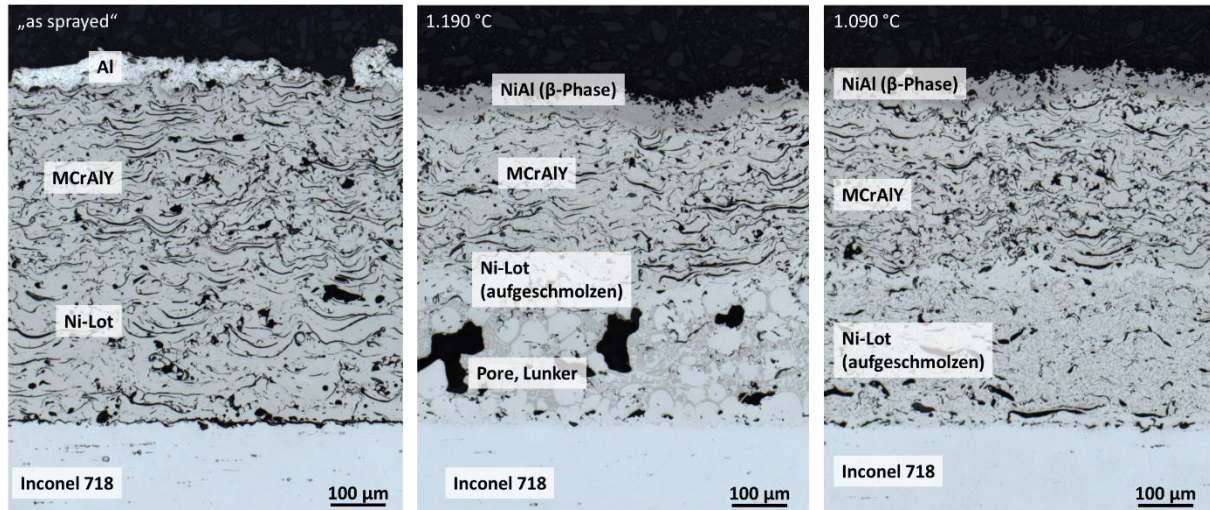


Abb. 2: Inconel 718 Proben, „as-sprayed“, wärmebehandelt bei 1.190 °C und 1.090 °C

Ausgehend vom Inconel 718 folgt das Nickelbasislot, die MCrAlY Heißgaskorrosionsschutzschicht und abschließend das Aluminium. Im Zustand „as-sprayed“ ist die Grenze zwischen Lot und MCrAlY schwer zu erkennen. Nach der Wärmebehandlung wird diese jedoch deutlich sichtbar, was darin begründet ist, dass das Lot aufgeschmolzen ist und sich das Gefüge ändert. Des Weiteren lässt sich auf der Oberfläche der applizierten Schicht ein ca. 50 μm dicker grauer Bereich erkennen, der auf die Bildung der NiAl-Phase (β-Phase) zurückzuführen ist [6]. Bei 1.190 °C treten an vereinzelt Stellen Poren, bzw. Lunker (ca. 100 μm) im Lot auf, die durch Diffusionsvorgänge, Seigerungs-effekte und den Kirkendall-Effekt verursacht werden. Die Problematik der Poren-, bzw. Lunkerbildung wurde schon in [5] diskutiert und konnten durch einen kombinierten Löt/Alitierprozess in einer Pulverpackung mit angepasstem Temperatur-Zeit-Profil, welcher insgesamt 36 Stunden dauerte, reduziert werden. Im Rahmen der laufenden Arbeiten konnte erfolgreich gezeigt werden, dass bei einer Temperatur von 1.090 °C die Poren/Lunker reduziert werden konnten, bei gleichzeitiger Verkürzung der Prozessdauer. Grund für die Porenreduzierung ist, dass die Diffusions- und Seigerungseffekte langsamer ablaufen und die Viskosität des Lotes höher ist als bei 1.190 °C. Die Zugfestigkeiten gelöteter Stumpfstoßverbindungen liegen bei 430 ± 30 MPa und liegen somit im Rahmen, wie man sie bei solchen Werkstoffsystemen erwartet [8].

Ein ähnliches Bild liefert die Applikation eines Titanlotes (Ti15Cu15Ni) durch Kaltgas-spritzen. *Abbildung 3* zeigt die Schliffbilder einer beschichteten TiAl6V4-Probe im Zustand „as-sprayed“ und einer wärmebehandelten Probe sowie einer gelöteten Stumpfstoßverbindung bei 1.000 °C [7].

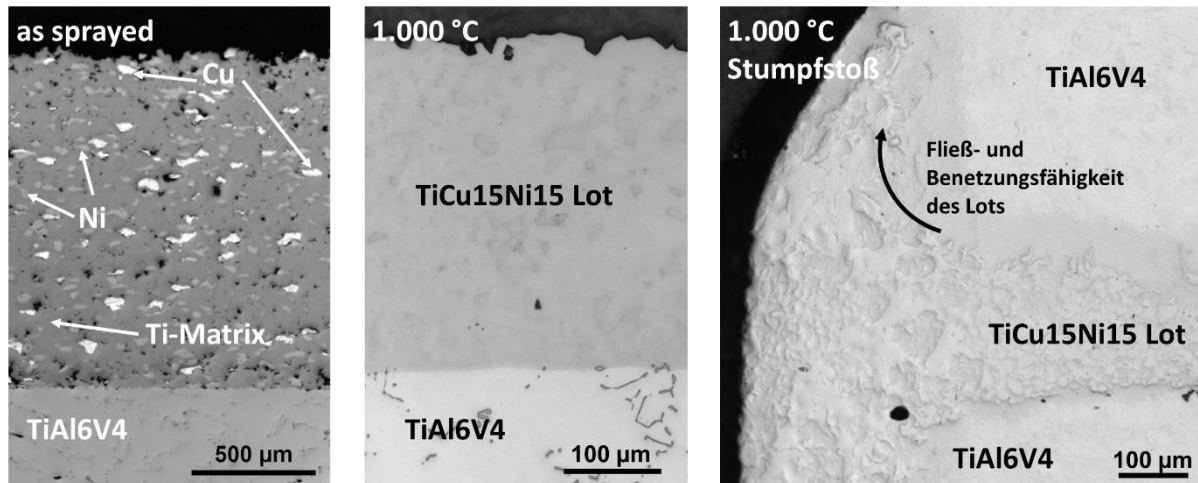


Abb. 3: TiAl6V4 Proben, „as-sprayed“, wärmebehandelt und gelötete Stumpfstoßverbindung bei 1.000 °C [7]

Wie im vorigen Abschnitt erwähnt, wurde das Titanlot durch Mischen der entsprechenden Pulver (Pulverfraktionierung < 45 µm) unter Verwendung eines Taumelmischers hergestellt. Wie in *Abb. 3* im Zustand „as-sprayed“ zu sehen, sind Nickel (weiß) und Kupfer (grau) in einer Titanmatrix (dunkelgrau) gleichmäßig verteilt. Aus der optischen Analyse der Beschichtung ergeben sich Masseanteile von ca. 68% an Titan und jeweils 16% an Kupfer und Nickel. Es zeigt sich, dass es zu keiner nennenswerten Entmischung der einzelnen Legierungselemente gekommen ist. Nach der Wärmebehandlung bei 1.000 °C und einer Haltezeit von 15 Minuten bildet sich eine dichte, homogene Schicht mit vereinzelt auftretenden Poren, die auf lokale Konzentrationsunterschiede und den damit verbundenen Diffusionsvorgängen zurückzuführen sind (Kirkendall-Effekt). Das Schliffbild der gelöteten zylindrischen Stumpfstöße zeigt die gute Fließfähigkeit und Anbindung des kaltgasgespritzten Lotsystems an den Grundwerkstoff. Dieses Verhalten wird auch durch die Zugfestigkeiten untermauert, die bei (450 ± 30) MPa liegen. In der Literatur [9] findet man für Titanlegierungen Festigkeitswerte, die zwischen 300 und 800 MPa liegen, je nach verwendeter Zusammensetzung, Löttemperatur und Lötzeit.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Die hier vorgestellten Ergebnisse zeigen die Machbarkeit, Nickelbasis- und Titanbasislote durch thermisches Spritzen zu applizieren, wobei ihre Eigenschaften im Hinblick auf Fließ- und Benetzungsfähigkeit sowie Festigkeiten gleichwertig mit kommerziellen Lotpulvern, -Tapes und -Pasten sind. Die ermittelten Festigkeiten thermisch gespritzter Lote erreichten bei Anwendung eines Standardlötprozesses Werte, wie sie auch in der Literatur zu finden sind. Die aus diesem Forschungsvorhaben gewonnenen Erkenntnisse legen nahe, den Lötprozess zukünftig auch in einem Schutzgasdurchlaufofen durchzuführen, sodass hier ein kontinuierlicher Prozess durchgeführt werden kann, was weitere wirtschaftliche Vorteile mit sich bringt.

Danksagung

Gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) – SFB871/3-119193472

Literatur

- [1] Huang, X.; Miglietti, W.: Wide Gap Braze Repair of Gas Turbine Blades and Vanes - A Review. J. Eng. Gas Turbines Power, 134(1), 2011, S. 010801–010801-17
- [2] Henderson, M. B.; Arrell, D.; Larsson, R.; Heobel, M.; Marchant, G.: Nickelbased superalloy welding practices for industrial gas turbine applications, Science and Technology of Welding and Joining, 9(1), 2004, S. 13–21
- [3] Stolle, R.: Conventional and advanced coatings for turbine airfoils, MTU Aero Engines Munich http://www.academia.edu/7789702/Conventional_and_advanced_coatings_for_turbine_airfoils, 2004, aufgerufen am 19 Oktober 2020.
- [4] Zhan, Z.; He, Y.; Li, L.; Liu, H.; Dai, Y.: Low-temperature formation and oxidation resistance of ultrafine aluminide coatings on Ni-base superalloy, Surface & Coatings Technology, 203, 2009, S. 2337–2342
- [5] Nicolaus, M.; Rottwinkel, B.; Alfred, I.; Möhwald, K.; Nölke, C.; Kaierle, S.; Maier, H. J.; Wesling, V.: Future regeneration processes for high-pressure turbine blades, CEAS Aeronaut J 9, 2018 (1), S. 85–92, DOI: 10.1007/s13272-017-0277-9

- [6] Nicolaus, M., Möhwald, K., Maier, H. J.: A Combined Brazing and Aluminizing Process for Repairing Turbine Blades by Thermal Spraying Using the Coating System NiCrSi/NiCoCrAlY/Al, *Journal of Thermal Spray Technology*, Vol. 26, 2017 (7), S. 1659–1668, DOI: 10.1007/s11666-017-0612-z
- [7] Nicolaus, M., Möhwald, K., Maier, H. J.: Application of a titanium filler metal by cold gas dynamic spraying, *Thermal Spray Bulletin* 72, 2020(2), S. 108–113
- [8] Lugscheider, E.; Partz, K.-D.: High Temperature Brazing of Stainless Steel with Nickel-Base Filler Metals, *Welding Research Supplement*, 1983, 6, S. 160–164
- [9] Ganjeh, E.; Sarkhosh, H.; Bajgholi, M. E.; Khorsand, H.; Ghaffari, M. H.: Increasing Ti–6Al–4V brazed joint strength equal to the base metal by Ti and Zr amorphous filler alloys, *Materials Characterization*, 2012, 71, S. 31–41
- [10] DIN EN ISO 6892-1:2017-02 Metallische Werkstoffe - Zugversuch - Teil 1: Prüfverfahren bei Raumtemperatur (ISO 6892-1:2016); Deutsche Fassung EN ISO 6892-1:2016

Autorenanschriften

Dr. rer. nat. Martin Nicolaus

Leibniz Universität Hannover

Institut für Werkstoffkunde

Stockumer Str. 28

58453 Witten

Telefon: 02302-661647

Telefax: 02302-661650

E-Mail: nicolaus@iw.uni-hannover.de